文章编号:1000-4939(2023)06-1412-09

基于 CFD 的两栖式清淤机器人水动力特性研究

芮宏斌,郑文哲,李路路,曹伟

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院,710048 西安)

摘　要:针对某两栖式清淤机器人,基于计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)分析其静浮态和航行阻力。采用重叠网格方法计算静浮态下的吃水深度和纵倾角;分别采用静态网格方法和重叠网格方法预测两栖式清淤机器人静水直航工况的航行阻力,并对这两种方法进行对比。研究结果表明:采用重叠网格的方法可以有效计算两栖式清淤机器人静浮态下的吃水深度和纵倾角;静态网格方法和重叠网格方法均能有效预测两栖式清淤机器人水上航行阻力,静态网格方法计算效率高,但仅适用于航速较低的工况,而重叠网格方法适用于不同航速下的航行阻力预测,但计算效率较低。研究结果对两栖式清淤机器人的设计及改进有较大参考价值。

关键词:两栖式清淤机器人;计算流体力学;重叠网格;静浮态;航行阻力

中图分类号:TV53+5　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.06.022

Research on hydrodynamic characteristics of amphibious desilting robot based on CFD

RUI Hongbin,ZHENG Wenzhe,LI Lulu,CAO Wei

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering,Xi'an University of Technology,710048 Xi'an,China)

Abstract: Based on computational fluid dynamics (CFD), the floating state and sailing resistance of amphibious desilting robot were analyzed. The draft depth and pitch angle were obtained by calculating the floating state with the overlapping mesh method. The static mesh method and overlapping mesh method were used to predict the sailing resistance of amphibious desilting robot and the two methods were compared. The results show that the draft depth and pitch angle of the amphibious desilting robot can be calculated effectively by using the overlapping mesh method. Both the static grid method and the overlapping mesh method can predict the sailing resistance of amphibious desilting robot. The static mesh method has high efficiency, but can only apply to the situation of the low sailing speed. While the overlapping mesh method is suitable for sailing resistance prediction under different sailing speed, it has low efficiency. The results are of great reference value to the design and improvement of amphibious desilting robot.

收稿日期:2021-11-24　　**修回日期**:2022-06-10

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 51775432);陕西省技术创新引导专项基金资助项目(No. 2018ZKC-160)

通信作者:郑文哲。E-mail:1498889868@qq.com

引用格式:芮宏斌,郑文哲,李路路,等. 基于 CFD 的两栖式清淤机器人水动力特性研究[J]. 应用力学学报,2023,40(6):1412-1420.

RUI Hongbin,ZHENG Wenzhe,LI Lulu,et al. Research on hydrodynamic characteristics of amphibious desilting robot based on CFD[J]. Chinese journal of applied mechanics,2023,40(6):1412-1420.

Key words: amphibious desilting robot; computational fluid dynamics; overlapping grid; floating state; sailing resistance

近几年来,大规模土地开发加上连续暴雨天气,导致我国河道、湖泊的淤泥沉积问题严重,该现象大大削减了我国蓄水、排水的能力,洪涝灾害时常发生。因此,河湖的疏浚、清淤工作得到高度的关注和重视[1]。我国拥有大量复杂河网和中小型河道,疏浚、清淤工作复杂且难度大,人工清淤、船载挖掘机和大型清淤船等不适用于这些复杂工况,其工作效率、自动化和智能化程度较低,而中小型两栖式清淤机器人凭借其较高的自动化和智能化,在清淤行业有广阔的发展前景。

目前两栖式清淤机器人水动力特性研究较少,考虑到两栖式清淤机器人作为一种特殊的水上航行器并结合其工作特点,发现浮性和快速性是其水动力特性中的研究重点。浮性是两栖式清淤机器人最基本性能,是其他性能研究的基础,在一定程度上反映了机器的承载能力,其核心问题是静浮态的计算;快速性对于机器在水上航行的能力和动力匹配起着重要作用,直接决定了两栖式清淤机器人的工作效率,其核心问题是航行阻力的预测[2]。近年来,不少学者通过计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)的方法对浮性、快速性和其他水动力特性进行研究,周景涛等[3]采用滑移网格方法研究两栖车水上纵倾姿态的变化,在该基础上预测水上航行阻力,并研究了阻力各成分与行驶速度之间的数学关系。郑翔玉等[4]通过静态网格方法发现将两栖车辆的车轮收起能有效降低航行阻力。赵彬等[5]采用混合耦合算法和动网格技术研究静水直航下两栖车辆的姿态变化情况。蔡宇峰等[6]通过重叠网格的方法对带有自由液面的两栖车辆绕流场进行分析,并得到两栖车辆的水动力学特性。王少新等[7]建立了三自由度的双车厢两栖车辆模型,并基于重叠网格研究了其航行阻力、纵摇、垂荡运动性能。李海宁等[8]采用重叠网格和结构网格对圆柱的绕流场进行研究,分析不同雷诺数下流体动力学特性的多个参数的变化情况。可见,采用 CFD 数值计算方法研究水动力特性已相对成熟,本研究采用 CFD 数值计算方法对两栖式清淤机器人的水动力特性进行研究。

本研究基于 CFD 以某型两栖式清淤机器人为研究对象,主要计算两栖式清淤机器人静浮态下的吃水深度和纵倾角,并预测静水直航下的航行阻力。首先通过重叠网格方法对其静浮态进行分析,得到其静浮时的吃水深度和纵倾角度;再采用静态网格和重叠网格两种不同方法预测两栖式清淤机器人在静水直航工况下的航行阻力;最后比较这两种方法的预测结果,分析这两种方法的适用性和优劣性。通过 CFD 数值计算得到的两栖式清淤机器人的静浮态和航行阻力相关数据为后续机器人的承载能力的判断、发动机的动力匹配、整机的推进效率等问题提供数据参考,为掌握两栖式清淤机器人的关键技术提供理论依据和技术支持。

1　数学模型和数值计算方法

1.1　研究对象

本研究以某型两栖式清淤机器人为研究对象,采用 CFD 方法研究清淤机器人外流场以及流场和清淤机器人之间的相互作用。

简化的两栖式清淤机器人结构如图 1 所示,总重约为 13.7 t,机体长度为 10.03 m(包含前浮箱),机体宽度为 5.3 m(包含测浮箱),挖掘臂配备 400 L 铲斗,最大航行速度为2 m/s。

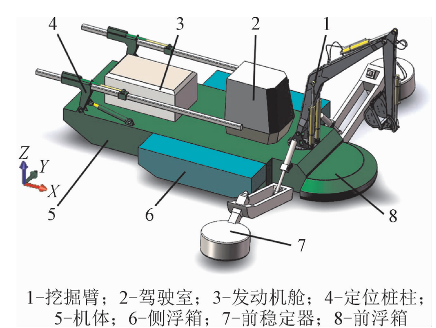


图 1　两栖式清淤机器人结构示意图

Fig. 1　Structure diagram of amphibious silt cleaner

基于 CFD 研究两栖式清淤机器人的水动力特性必须确定外流场结构。保留两栖式清淤机器人最外层表面结构并生成面网格,使其成为单连通区域,在计算域和该单连通区域之间的结构即为外流场结构。

1.2 CFD 数值计算方法

结合本研究使用的 CFD 商业软件 STAR-CCM + 介绍相关数值计算方法。

1.2.1 控制方程和湍流模型

流体在流动过程中遵循物理守恒三大定律:质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律,由于本研究中不涉及热交换问题,故不考虑能量守恒定律。相应的控制方程如下。

1)质量守恒方程:质量守恒方程也被称为连续性方程,其方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial z}=0 \quad (1)$$

式中:ρ 为流体的密度;u、v、w 为流体速度矢量在 x、y、z 轴上的分量。

2)动量守恒方程:动量守恒方程的实质是牛顿第二定律,本研究中的流体均是黏性为常数的不可压缩牛顿流体,则动量守恒方程就是 Navier-Stokes (N-S)方程。其公式为

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t}+(\vec{u}\cdot\vec{\nabla})\vec{u}=\vec{f}-\frac{1}{\rho}\vec{\nabla}p+v\vec{\nabla}^{2}\vec{u} \quad (2)$$

式中:$\vec{u}$为流体速度矢量;$\vec{\nabla}$ 为哈密顿算子;$\vec{f}$ 为单位质量力;p 为压强;ν 为运动黏度;$\vec{\nabla}^2$ 为拉普拉斯算子。

本研究的湍流模型采用 Realizable k-ε 模型,该模型既保留了标准 k-ε 模型的优点,如适用性强,计算量适中且精度较好等,又克服了标准 k-ε 模型在计算强旋流和弯曲流时精度较低的缺点,避免应变率较大时计算出现负应力的问题,在类似研究的数值计算中具有广泛应用。

1.2.2 计算域和边界条件

计算域足够大才能准确计算流场中的物理量,但是过大的计算域会使网格数量过多,计算效率低。整个计算域边界如图 2 所示,入口设置为速度入口,由清淤机器人前端向前延伸 15 m,可在速度入口设置相应的流体速度模拟航行速度;出口设置为静压出口,由清淤机器人后端向后延伸 30 m;顶部设置为速度入口,由清淤机器人机体中间位置向上延伸 10 m;底部设置为速度入口,由清淤机器人机体中间位置向下延伸 20 m;左右壁面设置为对称面,相距 40 m[5]。这种设置方法能模拟出无限宽广的流体空间,消除计算域边界形成边界层造成的流场紊乱问题。为了防止数值计算过程中已产生的波通过计算域边界反射,还需要将入口、出口和壁面设置为阻尼边界。

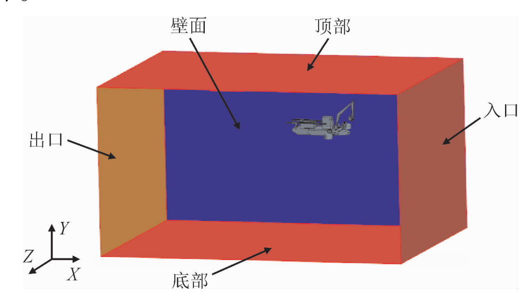


图 2 计算域的边界条件

Fig. 2 Boundary conditions of computational domain

1.2.3 网格设置

本研究的外流场结构相对复杂,故采用局部适应性较强的切割体网格。为了保证计算结果准确,在两栖式清淤机器人模型附近流场添加加密区域,如图 3 中 1 区域,以获取清淤机器人周围流场详细的信息;在水面附近添加加密区域,如图 3 中 2 区域,可获取准确的水面波形。不同区域的网格大小不同,为了便于网格之间的数据交换,不同网格之间尽量采用 2 倍变化率进行过渡[8]。

为了求解两栖式清淤机器人在流场中的运动,则需要利用动网格技术来满足运动过程中网格的变化情况。常用的动网格技术有网格重构、滑移网格、重叠网格等,由于重叠网格技术适用于复杂模型的网格变化问题,因此本研究采用重叠网格技术[2],重叠网格如图 3 中 3 区域。

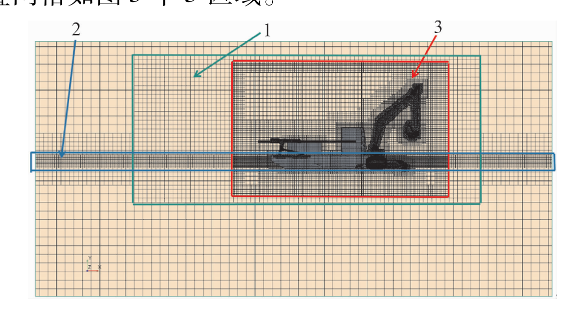


图 3 流场网格划分

Fig. 3 Mesh generation of flow field

进行网格无关性验证后,将本研究的数值计算模型的体网格数量和质量整理如表 1 所示。

表 1 体网格数量和质量

Tab. 1 Quantity and quality of volume mesh

网格数量	0.1≤网格质量≤1/%	网格质量<0.1/%
4 805 752	98.885	1.115

1.2.4 自由液面模拟

自由液面的模拟能提供航行过程中水面波形变

化情况,也是准确预测航行时兴波阻力的关键技术。两栖式清淤机器人外流场属于典型的气液两相流问题,选择欧拉多相分离流物理模型定义水和空气两种流体。目前模拟气液两相流自由液面的方法有 VOF 法、MAC 法、Level Set 法等,VOF 法具有占用计算机资源少,计算准确等优势[2],故采用 VOF 法。

VOF 法又称为流体体积法,该方法基于网格单元体积比的概念,流体总体的体积分数为 1,通过计算过程中某种流体网格所占的体积比,从而得到各项流体在空间的分布、流动情况,进而确定自由液面的位置。

1.2.5　六自由度体设置

研究两栖式清淤机器人在水上的运动情况时需将其设置为六自由度体,即沿空间直角坐标系 X、Y、Z 三轴的平动和绕三轴的转动,从而模拟复杂的水上运动[8-9]。

STAR-CCM + 的 DFBI(dynamic fluid body interaction)运动模型实现了流固动力学耦合,通过流体和固体之间的相互作用计算固体模型在流场中的运动情况,固体的运动亦影响到流体的流动情况,如波形等。由于两栖式清淤机器人左右完全对称,在研究浮性和快速性时仅考虑升沉和纵倾两个自由度上的运动[10]。

2　静浮态分析

为了保证驾驶舒适性和视野开阔,通常要求两栖式清淤机器人能水平静浮在水面上。通过 CFD 的方法研究两栖式清淤机器人的静浮态可得到其准确的吃水深度以及纵倾角大小,有利于调配两栖式清淤机器人的配重,在一定程度上推论其承载能力,计算得到的静浮态也是后续各水动力特性研究的基础。

2.1　水上静浮的受力分析

研究两栖式清淤机器人静浮在水面上将建立以下假设[11]。

1)水是不可压缩流体。

2)水面平静、无波浪,水面上无风。

3)不考虑水面张力。

在以上假设的基础上,两栖式清淤机器人静浮时只受重力和静水压力的作用。静水压力在水平方向上的分力相互抵消,垂直方向上的分力则是静浮力,静浮力的作用点为排水体积的形心,大小为排水的重量。两栖式清淤机器人水上静浮问题从本质上来说是重力和浮力的大小以及重心和浮心相对位置关系的问题,其水上静浮的平衡条件为:重心和浮心的作用线在同一条垂直线上,且重力的大小等于浮力的大小[2]。两栖式清淤机器人水上静浮受力示意图如图 4 所示,其中 O 为重心,G 为重力,C 为浮心,D 为浮力。在实际中,两栖式清淤机器人水上静浮时往往和水面之间形成某一角度,该角度为纵倾角,即图 4 中的 θ。

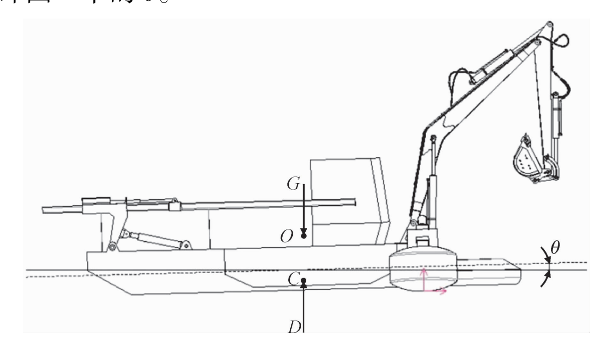


图 4　两栖式清淤机器人水上静浮受力示意图

Fig. 4　Force diagram of amphibious silt cleaner floating on water

2.2　数值计算的设置

吃水深度是两栖式清淤机器人重要参数之一,由于两栖式清淤机器人的形状并非规则形状,所以静浮时的排水体积并非关于吃水深度和纵倾角 θ 的简单函数关系,这就为两栖式清淤机器人水上静浮态的分析和计算增加了难度。

为了找出两栖式清淤机器人的水上静浮态,国内相关研发单位常采用水上试验来确定。该方法需要生产出实物或者比例模型,且需要配备相关精密仪器,花费大且效率低[12]。国内部分学者通过对 SOLIDWORKS 等三维建模软件进行二次开发,进而研究两栖车辆的静浮时的位姿以及相关的水上性能[13],这些方法能较准确地找到静浮位姿,但过程繁琐且所能求得的水上性能参数较少,具有一定的局限性。

本研究基于 CFD 研究两栖式清淤机器人的静浮态,该方法具有结果直观且花费少等优势。在上文中介绍的 CFD 设置基础上,设置流速为 0 的静水,两栖式清淤机器人水平浮在水面上($\theta = 0°$),吃水深度为 400 mm,初始时刻两栖式清淤机器人的受力情况如图 5 所示。

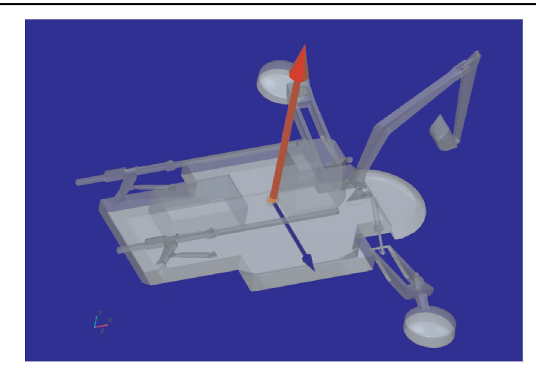


图5　初始时刻的受力图

Fig. 5　Force diagram of initial time

如图5所示：红色矢量为流体作用于两栖式清淤机器人重心处的力，其大小等于初始时刻的浮力D_0；蓝色矢量为流体作用于两栖式清淤机器人重心处的力矩。由蓝色矢量的方向可知初始时刻浮心C的位置在重心O的前方，此时两栖式清淤机器人受力不平衡，位姿发生变化直到红色矢量和重力平衡、蓝色矢量为0才达到平衡状态。

2.3　数值计算结果与分析

整个数值计算共迭代6 400步，对应物理时间约为12.8 s，记录整个过程中升沉量和纵倾角的变化如图6～7所示。

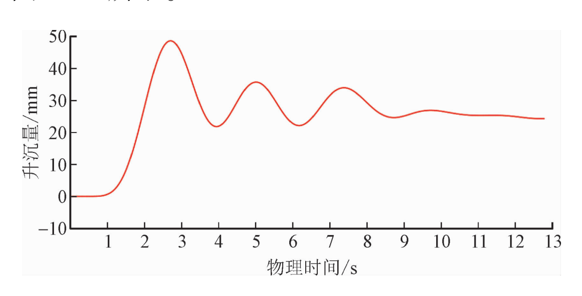


图6　静浮态下升沉量变化曲线

Fig. 6　Curve of heave of center of gravity

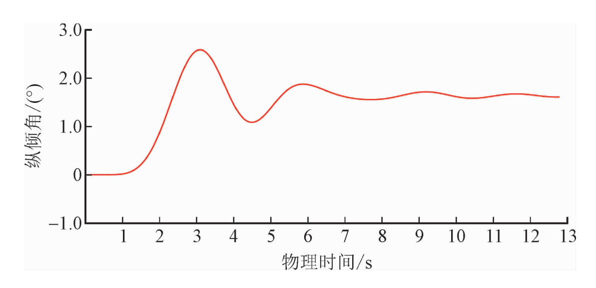


图7　静浮态下纵倾角变化曲线

Fig. 7　Curve of pitch angle

由图6～7可知，两栖式清淤机器人从初始位置经历了最初的大幅度调整后调整幅度逐渐减小，整个过程类似于幅值减小的三角函数曲线，并在物理时间10 s之后，两栖式清淤机器人基本达到了静浮态平衡，升沉量为25 mm，即静浮态时吃水深度为375 mm，纵倾角为1.6°。当液压臂前伸时整机的重心前移，浮心位置也必须前移以满足静浮条件，纵倾角会减小，因此保留少量的正向纵倾角是很有必要的，即少量的“艉倾”姿态。同时，少量的“艉倾”姿态增大了螺旋桨的浸深度，提高推进能力。可见，此两栖式清淤机器人的静浮态设计是满足要求的。

为了验证数值计算的正确性，记录下两栖式清淤机器人所受浮力如图8所示。可知浮力在大约10 s后达到稳定状态，且浮力最终为134 277.88 N，该数值和两栖式清淤机器人重力基本吻合。

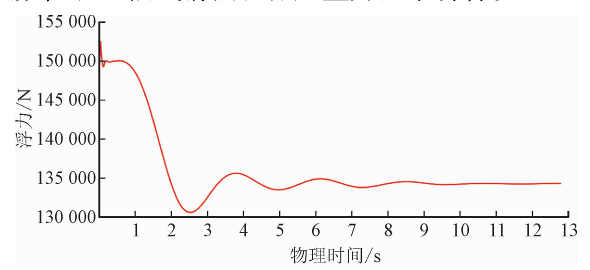


图8　静浮态下浮力变化曲线

Fig. 8　Curve of buoyancy

3　航行阻力预测

两栖式清淤机器人水上航行阻力对其动力匹配有着十分重要的指导作用。此外，合理分析清淤机器人的航行阻力有助于对其进行减阻优化，提高其航行速度，加快工作效率，同时有效控制污染排放及减少能源消耗。

3.1　航行阻力成分

当两栖式清淤机器人在水上匀速航行时，其航行阻力分为水阻力和空气阻力，一般认为空气阻力太小而忽略。水阻力R_T是摩擦阻力R_F、形状阻力R_{PV}和兴波阻力R_W之和，其中形状阻力和兴波阻力也被称为剩余阻力R_R，其关系式为

$$R_T = R_F + R_{PV} + R_W \tag{3}$$

$$R_R = R_{PV} + R_W \tag{4}$$

式中：摩擦阻力是机体与水之间的摩擦力，即运动方向上的切应力；形状阻力是清淤机器人前后表面压力不等所形成的阻力，其成因是流体沿着机器表面流动时发生在边界层的分离现象；兴波阻力是由于波浪导致压力分布改变而产生的阻力；剩余阻力均是由压差导致的[14]。

3.2　基于静态网格的航行阻力预测

在低速航行时航行姿态对于航行阻力影响较小[15]，因此考虑基于静浮态采用静态网格来预测航行阻力。

根据静浮态分析中得到的数据对模型位姿进行调整，采用静态网格预测两栖式清淤机器人最高航速（2 m/s）时静水直航工况下的航行阻力。当预测的航行阻力数值趋于稳定后停止数值计算，整个数值计算过程共迭代 3 200 步，该过程中的阻力变化如图 9 所示。

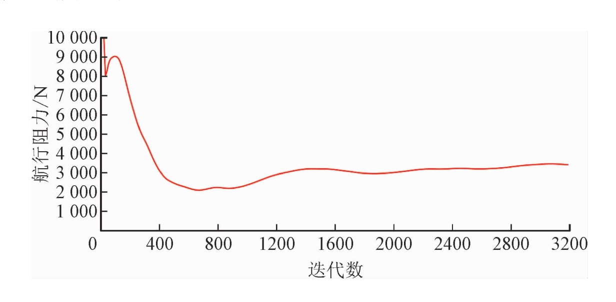


图 9　静态网格下航行阻力变化曲线

Fig. 9　Curve of sailing resistance

由图 9 可知，航行阻力在迭代 1 400 步后趋于稳定，最终数值为 3 405.58 N，其中水阻力为 3 396.77 N，空气阻力为 8.83 N，由于空气阻力过小，故不予考虑。水阻力系数 C_d 的计算公式为

$$C_d = \frac{F_d}{1/2 \rho v^2 S} \tag{5}$$

式中：F_d 为水阻力；ρ 为水的密度；v 为航速；S 为两栖式清淤机器人水下的湿表面积[8]。计算两栖式清淤机器人的水阻力系数 C_d 为 0.029。各部件的水阻力成分如表 2 所示。

表 2　静态网格下各部件的水阻力

Tab. 2　Water resistance of different parts

部件	摩擦阻力/N	剩余阻力/N	合计/N
机体	180.65	1 406.72	1 587.37
前稳定器	44.94	1 764.46	1 809.40
合计	225.59	3 171.18	3 396.77

从水阻力成分看，摩擦阻力占航行总阻力的 6.64%，剩余阻力所占比例为 93.36%；从各部件所受水阻力大小看，前稳定器所受水阻力占比达到 53.27%，整个机体（包括前浮箱和测浮箱）所受的水阻力占比为 46.73%。

3.3　基于重叠网格的航行阻力预测

3.3.1　航行阻力预测结果

采用重叠网格计算两栖式清淤机器人 2 m/s 航速下由设置的初始状态达到平衡状态过程的升沉量、纵倾角以及航行阻力的变化情况。整个数值计算共迭代 15 000 步，对应物理时间为 30 s，整个过程中航行阻力如图 10 所示。

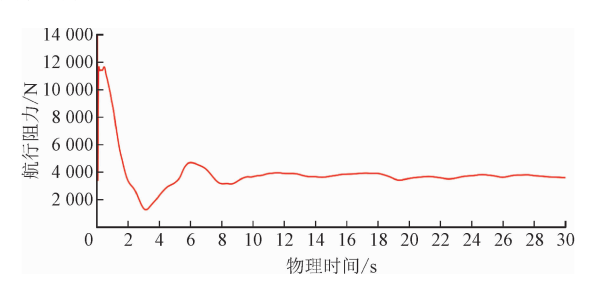


图 10　重叠网格下航行阻力变化曲线

Fig. 10　Curve of sailing resistance

由图 10 可知，航行阻力于 10 s 后趋于稳定，最终数值为 3 594.40 N，其中水阻力为 3 585.84 N，空气阻力为 8.56 N，由式（5）计算得到两栖式清淤机器人的水阻力系数 C_d 为 0.031。不同部件所受的水阻力如表 3 所示。

表 3　重叠网格下各部件的水阻力

Tab. 3　Water resistance of different parts

部件	摩擦阻力/N	剩余阻力/N	合计/N
机体	191.14	1284.41	1 475.55
前稳定器	44.60	2 065.69	2 110.29
合计	235.74	3 350.10	3 585.84

从水阻力成分角度看，摩擦阻力占水阻力的 6.57%，剩余阻力占比为 93.43%。该结论与文献[14]的结论“在傅如德系数 $F_{r\nabla}$ 较小阶段（$F_{r\nabla}$ < 0.30），两栖车航行阻力以黏压阻力为主，占比为 60% ~70%，摩擦阻力在 10% 左右，兴波阻力通常不超过 30%”[14]基本一致，这是由于两栖式清淤机器人外形为箱型体，在航行时会产生大量的流动分离和兴波，导致剩余阻力很大，而低速航行时摩擦阻力较小。

从各部件所受水阻力大小看，前稳定器的水阻力占比为 58.85%，可见前稳定器对于两栖式清淤机器人的航行阻力影响较大。

以重叠网格数值计算的结果为基础，计算静态网格方法所得各项阻力的偏差，统计如表 4 所示。

由表 4 可知，以静浮态为基础采用静态网格对

两栖式清淤机器人航行阻力的预测结果和采用重叠网格方法的预测结果整体相差较小，但对于前稳定器的剩余阻力预测结果相差较大。

表4　各阻力的偏差

Tab. 4　Deviation of resistance

阻力成分		偏差/(%)	
机体	摩擦阻力	-5.49	7.58
	剩余阻力	9.52	
前稳定器	摩擦阻力	0.76	-14.26
	剩余阻力	-14.58	
整体	摩擦阻力	-4.31	-5.27
	剩余阻力	-5.34	
空气阻力		3.15	

3.3.2　浮力及位姿变化情况

记录下整个过程中浮力的变化情况如图11所示。浮力于10 s后趋于稳定，最终数值为134 208.86 N，该数值和两栖式清淤机器人重力基本吻合。

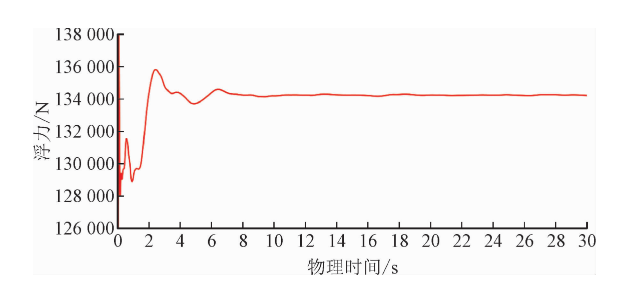


图11　航行态下浮力变化曲线

Fig. 11　Curve of buoyancy

由于两栖式清淤机器人水上航行是一个动态过程，因此其位姿变化处于动平衡。整个过程两栖式清淤机器人的升沉量和纵倾角变化情况如图12～13所示。

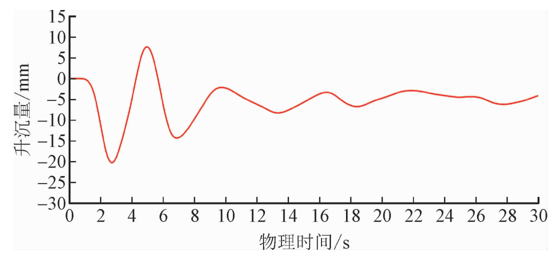


图12　航行态下升沉量变化曲线

Fig. 12　Curve of heave of center of gravity

可图12～13可知，航行过程中的升沉量和纵倾角变化较小，这是由于两栖式清淤机器人重量大且航速低。20 s之后清淤机器人基本处于动平衡的状态，升沉量为-4 mm，即吃水深度为404 mm，纵倾角为1.19°。发现两栖式清淤机器人低速航行时会出现吃水深度增加、纵倾角减小，即机器下沉、艏倾程度增大的规律。这是由于水流流过机器时使得流速增加，从而导致水作用于机器的压力减小，机器略微下沉，且机首处水流速度增大更多，导致机器艏倾程度增加，机体底部的压力云图(图14)可验证该规律。

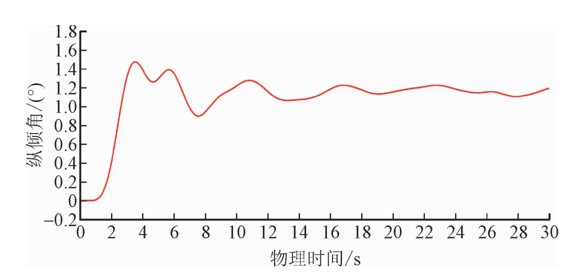


图13　航行态下纵倾角变化曲线

Fig. 13　Curve of pitch angle

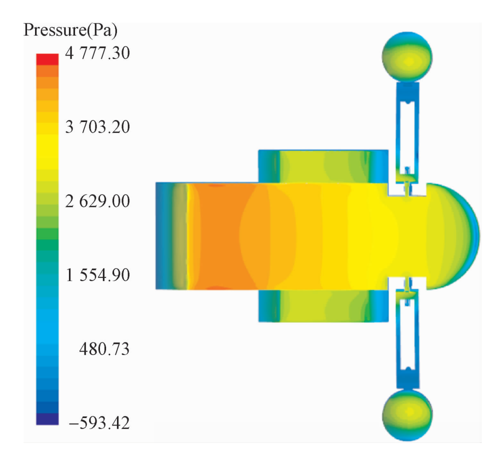


图14　机体底部压力云图

Fig. 14　Pressure cloud chart of bottom of machine body

3.3.3　前稳定器的水阻力分析

前稳定器相对于清淤机器人机体而言体积较小，但受到了较大的水阻力，且采用静态网格和重叠网格两种方法对其剩余阻力预测结果相差较大，现对前稳定器的水阻力进行分析。

根据前稳定器前后压强图(图15)发现：两栖式清淤机器人的前稳定器在其A、B区域处前后高压面积和压强相差较大，这直接导致了前稳定器受到较大剩余阻力。由波形高度图(图16)可知：A区域主要是由于流过前浮箱的高速流体冲击造成前后压差较大；B区域则是由于在该处产生了类似于两栖车辆车首波系的波浪，导致此处高压面积和前后压差相差较大。综上所述，前稳定器受到的剩余阻力较大。又由于前稳定器的形状圆滑无棱角，所以水

上航行时造成的摩擦阻力较小。

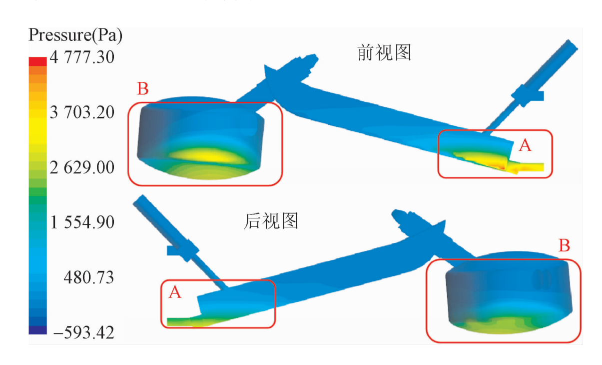


图 15　前稳定器前后压强图

Fig. 15　Pressure diagram of front stabilizer

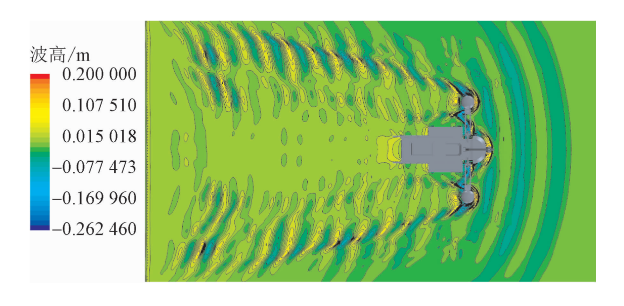


图 16　航行时波形高度图

Fig. 16　Wave height while sailing

造成前稳定器剩余阻力较大的原因复杂，且吃水深度和纵倾角能直接影响到高压面积的分布情况，静态网格方法基于静浮态而忽略了航行时两栖式清淤机器人的位姿变化，因此会造成较大的偏差。

4　结　论

本研究采用重叠网格对某两栖式清淤机器人水上静浮态进行数值计算并得到其吃水深度和纵倾角；采用不同的方法对两栖式清淤机器人水上航行阻力进行预测，对比并分析了两种方法的优劣。本研究的计算结果可为后续水中推进、发动机的动力匹配等问题提供数据支持，为掌握两栖式清淤机器人的关键技术提供理论依据和技术支持。得到以下结论。

1）通过数值计算得到某型两栖式清淤机器人静浮态下的吃水深度为 370 mm，纵倾角为 1.6°；航速为 2 m/s 时静水直航的航行阻力预测为 3 594.4 N，水阻力系数为 0.036。

2）采用静态网格和重叠网格均能预测两栖式请与机器人航行的航行阻力。从计算效率看，前者迭代 3 200 步即可得到稳定的计算结果，计算效率较高；后者迭代 15 000 步可得到稳定的计算结果，计算效率较低。从适用性看，前者由于忽略了两栖式清淤机器人水上航行姿态的变化，仅适用于航行姿态变化较小的低速航行工况；后者能计算航行姿态的变化情况，适用于各种航行工况。

3）两栖式清淤机器人低速航行时会出现机器下沉、艏倾程度增大的规律，这主要是由于机器附近水流流速增加，水作用于机器的压力减小造成的。

参考文献：

[1]　包建平，朱伟，闵佳华. 中小河道治理中的清淤及淤泥处理技术[J]. 水资源保护，2015，31(1)：56-62.
BAO Jianping，ZHU Wei，MIN Jiahua. Technology of dredging and sludge treatment in small and medium-sized river regulation[J]. Water resources protection，2015，31(1)：56-62(in Chinese).

[2]　王涛，徐国英，郭齐胜. 两栖车辆水上动态性能数值模拟方法及其应用[M]. 北京：国防工业出版社，2009：60-61.

[3]　周景涛，王怀光，周亮. 基于 CFD 的两栖车辆绕流场模拟和阻力成分分析[J]. 舰船科学技术，2013，35(12)：139-143.
ZHOU Jingtao，WANG Huaiguang，ZHOU Liang. The flow field simulation and resistance component analysis of amphibious vehicle based on CFD[J]. Ship science and technology，2013，35(12)：139-143(in Chinese).

[4]　郑翔玉，房凌晖，王琛，等. 两栖车辆水上快速性设计研究[J]. 四川兵工学报，2015，36(11)：34-37.
ZHENG Xiangyu，FANG Linghui，WANG Chen，et al. Research on rapidity design of amphibious vehicles[J]. Journal of Sichuan ordnance，2015，36(11)：34-37(in Chinese).

[5]　赵彬，张敏弟，剧冬梅. 基于动网格的两栖车航行姿态数值模拟[J]. 兵工学报，2015，36(3)：412-420.
ZHAO Bin，ZHANG Mindi，JU Dongmei. Numerical simulation of navigating pose for amphibious vehicle based on dynamic-mesh model[J]. Acta armamentarii，2015，36(3)：412-420(in Chinese).

[6]　蔡宇峰，王丽丽，汪宇，等. 基于计算流体动力学的两栖车辆水动力性能模拟及试验验证[J]. 系统仿真技术，2018，14(3)：183-187.
CAI Yufeng，WANG Lili，WANG Yu，et al. Hydrodynamical simulation of amphibious vehicle based on CFD and its experimental verification[J]. System simulation technology，2018，14(3)：183-187(in Chinese).

[7]　王少新，金国庆，王涵，等. 双车厢两栖车静水直航下的水动力性能研究[J]. 兵工学报，2020，41(3)：434-441.
WANG Shaoxin，JIN Guoqing，WANG Han，et al. Research on the hydrodynamic performance of a double-carriage amphibious vehicle

sailing in still water[J]. Acta armamentarii,2020,41(3):434-441(in Chinese).

[8] 李海宁,王海峰,郭修宇,等. 基于重叠网格与结构网格的圆柱绕流数值模拟[J]. 应用力学学报,2020,37(2):882-887.
LI Haining, WANG Haifeng, GUO Xiuyu, et al. Numerical simulation of flow around a cylinder based on overset grids and structural grids[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(2):882-887(in Chinese).

[9] WANG J H, WAN D C. CFD study of ship stopping maneuver by overset grid technique[J]. Ocean engineering,2020,197:106895.

[10] KAHRAMANOĞLU E, ÇAKICI F, DOĞRUL A. Numerical prediction of the vertical responses of planing hulls in regular head waves [J]. Journal of marine science and engineering,2020,8(6):455.

[11] 居乃鵕. 两栖车辆水动力学分析与仿真[M]. 北京:兵器工业出版社,2005:186-187.

[12] 王少新,王涵,金国庆,等. 水陆两栖车水动力性能与防浪板受力特性研究[J]. 兵器装备工程学报,2020,41(1):1-6.
WANG Shaoxin, WANG Han, JIN Guoqing, et al. Study on hydrodynamic performance of amphibious vehicle and mechanical characteristics of wave board[J]. Journal of ordnance equipment engineering,2020,41(1):1-6(in Chinese).

[13] 刘锋,贺小军,邢思茗. 基于Solidworks二次开发的两栖车辆浮态设计及静稳性分析[J]. 装甲兵工程学院学报,2009,23(6):35-39.
LIU Feng, HE Xiaojun, XING Siming. Floating state design and hydrostatical stability performance analysis of amphibian vehicle based on solidworks secondary development[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering,2009,23(6):35-39(in Chinese).

[14] 孙旭光,李勇,韦韬,等. 基于改进叠模方法的两栖车航行阻力成分研究[J]. 车辆与动力技术,2019(1):54-57.
SUN Xuguang, LI Yong, WEI Tao, et al. Analysis of resistance ingredient for amphibious vehicles based on calculation method of improved multiple model[J]. Vehicle & power technology,2019(1):54-57(in Chinese).

[15] 剧冬梅,项昌乐,周鹏飞,等. 纵倾角对轻型轮式两栖车辆的阻力特性影响研究[J]. 兵工学报,2015,36(1):19-26.
JU Dongmei, XIANG Changle, ZHOU Pengfei, et al. Analysis of the effect of trim angle on the resistance characteristics for wheeled amphibious vehicle[J]. Acta armamentarii,2015,36(1):19-26(in Chinese).

(编辑 张璐)